1222 大韓機械學會論文集 第14卷 第5號, pp. 1222~1233, 1990.

〈論 文〉

陰影寫眞의 畵像解析에 의한 디젤火焰에 관한 硏究

張英俊* · 朴浩俊** · 神本武征***

(1990년 6월 13일 접수)

A Study on the Diesel Flame by Means of Image Analysis of Shadow Photographs

Young-June Chang, Ho-Joon Park and Takeyuki Kamimoto

Key Words: Diesel Flame(디젤火焰), Rapid Compression Machine(急速壓縮裝置), Incident Light Extinction Method(入射光減衰法), Instantaneous Shadow Photographs(瞬間陰影寫眞), Soot Formation & Oxidation(매연의 生成 및 酸化), Soot Concentration(매연의 濃度), Heat Release Rate(熱發生率).

Abstract

The formation and oxidation processes of soot particles in a diesel flame were investigated with a rapid compression machine. A cloud of soot particles was successfully visualized by means of the instantaneous laser shadow photographs technique and the equivalence ratio of the soot formation zone was estimated from a measured fuel concentration distribution in a non-evaporating spray. The temporal and spatial variation of soot concentration in the flame was also correlated with the rate of heat release. Soot particles appears first in a region near the flame tip when diffusion combustion period starts, and its concentration is a maximum at about the end of injection, then decreases due to oxidation. The reason for soot being formed in a fuel lean region near the flame tip is the evaporated fuel requires time to be pyrolized as it travels through the burning fuel rich zone towards the flame tip.

記 號 說 明

C_s : 매연濃度, kg/m³
D : 매연粒子의 直徑, m
d : 노즐噴口徑, m
l : 光學距離, m
m_f : 噴射率, g/s
N : 매연의 數密度, m⁻³
Q_{ext} : 減衰係數
Q : 熱發生率, kJ/s
R_s : 매연變換率
r : 噴霧半徑方向의 距離, m
r_o : 噴霧의 半徑, m
t : 時間, ms
λ : 入射光의 波長, m
ρ_s : 매연의 密度, kg/m³
θ : 檢出半角, degree
τ : 透過率
τ_d : 着火지연, ms
ϕ : 當量比

*正會員, 釜山大學校 工科大學 精密機械工學科
**正會員, 釜山大學校 大學院
***東京工業大學 工學部 機械工學科

添 字

f : 燃料
s : 매연
$-$: 斷面內平均

1. 序 論

디젤機關에서 배출되는 炭素狀微粒子 소위 매연(soot)을 저감시키기 위해서 디젤火焰內에서 이 매연이 어떻게 生成되고 消滅되어가는가 하는 過程을 이해한다는 것은 중요한 일이다.

Aoyagi등[1]은 직접적인 가스샘플링법에 의하여, 또 Matsui등[2]은 2色法에 의해 直接噴射式 디젤機關內의 매연의 生成消滅過程을 조사하였으며, Kamimoto등[3]은 이들의 실험자료를 이용하여 디젤火焰內의 매연의 酸化速度를 계산하여 매연의酸化速度는 매연주위의 酸素分壓에 지배된다는 것을 밝혔다. 이들의 실험에 의하여 디젤火焰內의 매연의 生成酸化過程은 어느 정도 밝혀졌으나 實際機關內에서의 火焰의 擧動은 아주 복잡하기 때문에 디젤火焰內에서 매연의 生成消滅過程이 완전히 해명되었다고는 할 수 없다.

또 위와 같은 실험적인 硏究 以外에, 디젤機關으로부터 배출되는 매연의 量을 예측하는 연구도 많이 행해졌다. Khan등[4]은 매연의 酸化過程을 무시하고, 매연은 Arrhenius 反應速度法則에 따라서 火焰內의 燃料濃度가 높은 영역에서 생성된다고 가정하였으며, 또 池上등[5]은 매연濃度豫測에 있어서 化學平衡이 準正常的으로 적용된다고 가정하였다. Mansouri등[6]은 間接噴射式 디젤機關으로부터 배출되는 매연을 化學量論的 모델에 적용하여 火焰內의 매연의 濃度를 계산하고 있다.

以上과 같은 化學平衡 혹은 Arrhenius의 反應速度則에 근거를 둔 從來의 모델에서는 燃料의 濃度가 높을수록 매연이 많이 생성되고 있으나 急速壓縮裝置內의 單發噴霧火焰의 高速度寫眞에 의하면 當量比가 가장 높다고 생각되는 노즐부근에서는 輝焰度가 아주 낮아 이 관측 결과는 上述한 가정과 모순된다고 생각된다.

따라서 本 論文에서는 急速壓縮裝置에서 實現된 單發噴霧火焰內의 매연을 레이저陰影寫眞法에 의하여 可視化하고, 火焰內의 매연濃度의 時間的, 空間的分布를 조사한다. 또 前報[7]에서 측정된 非蒸發噴霧內의 當量比分布와 比較檢討하여 디젤火焰內의 매연 生成機構를 고찰하고, 雰圍氣條件에 따른 着火지연이 매연生成에 미치는 영향 및 매연生成과 熱發生率과의 관계를 밝힌다.

2. 測定原理

디젤火焰內의 매연濃度를 測定하는 方法에 있어서 두 종류의 測定方法을 이용하였다. 즉 火焰전체의 매연濃度를 定性的으로 측정할 때에는 陰影寫眞의 畵像解析法을, 火焰의 局部的인 매연濃度를 定量的으로 측정할 때에는 레이저빔減衰法을 이용하였다. 이 두 측정방법은 모두 아래에서 설명하는 入射光減衰法의 原理에 기초를 두고 있다.

强度 E_o, 波長 λ인 單色平行光을 火焰內의 매연群에 입사시키면 火焰背後에서의 평행광의 강도 즉, 透過光의 强度는 E로 감쇠한다. 이 때 연속스펙트럼을 갖는 火焰의 自發光은 中心波長 λ인 狹帶域 밴드 패스 휠터(band pass filter)를 透過光檢出機側에 넣어서 제거한다. 直徑 D인 매연粒子群이 균일하게 분산해 있고 또 光學距離가 짧은 경우에 透過光과 入射光의 比 즉, 透過率 τ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau=\frac{E}{E_o}=\exp\left(-Q_{ext}\frac{\pi}{4}D^2N1\right) \tag{1}$$

여기서 N은 매연粒子의 數密度, 1은 매연粒子群의 光學距離이다. Q_{ext}는 減衰係數이며 $\pi D/\lambda \ll 1$인 경우에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ext}=\frac{24\pi D}{\lambda}f(n,k) \tag{2}$$

式 (2)에서 $f(n,k)$는 매연의 複素屈折率 $m=n-ik$에 의하여 정해지는 定數로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f(n,k)=\frac{nk}{(n^2+k^2)^2+4(n^2-k^2)+1} \tag{3}$$

한편 매연粒子의 濃度 C_s는 매연粒子의 密度를 ρ_s라 할 때

$$C_s=\rho_s\frac{\pi}{6}D^3N \tag{4}$$

이기 때문에 식 (1), (2) 및 (4)에 의하여 C_s와 τ와의 관계는 다음과 같이 된다.

$$C_s=-\frac{\rho_s\lambda}{36\pi 1 f(n,k)}\log\tau \tag{5}$$

透過率 τ로 부터 매연의 濃度 C_s를 定量的으로

계산할 때 필요한 매연의 複素屈折率 m은 Chippet 등[8]의 값 $m=1.9-0.35i$를 사용하였으며 매연의 密度 ρ_s는 1.8g/cc[9]로 하였다.

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1 實驗裝置

實驗에는 Fig. 1에 보이는 바와 같은 急速壓縮裝置[10,11]를 사용하였다. 이 急速壓縮裝置의 燃燒室은 直徑이 196mm 폭이 40mm Pan-Cake型이며, 壓縮피스톤은 高壓窒素(70 氣壓)에 의하여 구동되며 油壓에 의하여 그 운동이 제어된다. 燃料의 噴射 方向은 두 종류가 있으며 Fig. 2(a)와 같이 벽면에 영향을 받지 않도록 수직 방향으로 噴射하는 噴霧火焰을 自由噴霧火焰, Fig. 2(b)와 같이 수직으로 부터 45° 방향으로 噴射하여 벽면에 충돌하는 것을 衝突噴霧火焰이라고 부르기로 한다. 이 때 노즐噴口로 부터 충돌위치까지의 거리는 약 31mm이다.

燃料의 噴霧는 펌프式 單發噴射裝置를 사용하였다. 이 噴射裝置에서는 펌프의 랙을 無噴射位置에 두고서 噴射할 때 에어실린더에 의하여 랙을 소정의 위치까지 1回만 움직이는 單發方式을 채용하고 있다. Fig. 3은 이 噴射系의 系統圖를 나타낸 것이다.

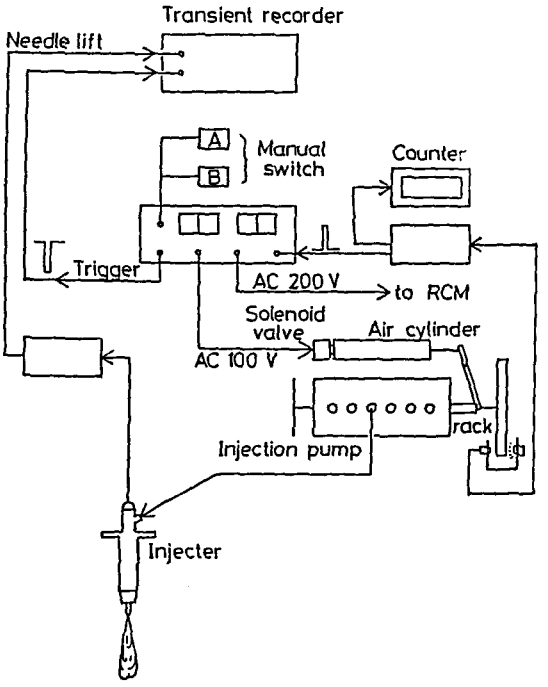

Fig. 3 Block diagram of injection system

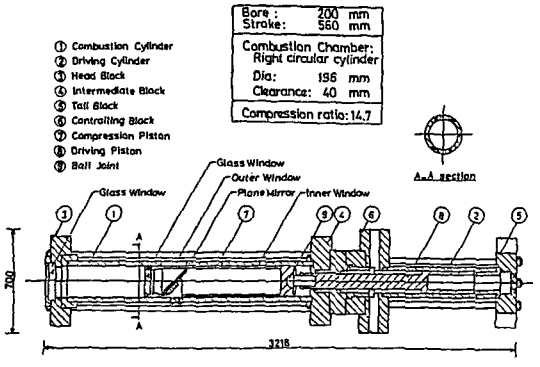

Fig. 1 Rapid compression machine

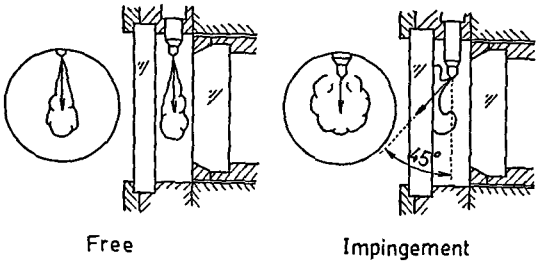

Fig. 2 Direction of fuel injection for free flame and impinging flame

3.2 陰影寫眞法

本 實驗에서는 瞬間陰影寫眞法을 이용하였으며 Fig. 4는 이 光學系를 나타내고 있다. 光源으로서는 發振波長 694.3mm, 出力 에너지 40MW, 發振時間 25msec인 루비펄스레이저를 사용하였다. 發振된 레이저는 Fig. 4의 렌즈 1 및 2에 의하여 넓

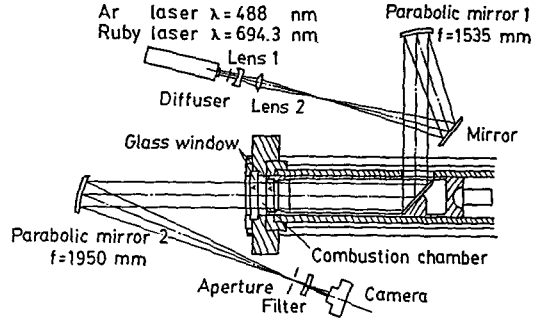

Fig. 4 Optical system of instantaneous shadow photographs

게 퍼진후 오목거울 1에 의하여 平行光으로 되어, 燃燒室內를 통과하면서 入射光의 일부가 火焰內에 生成된 매연粒子에 의하여 減衰되고, 오목거울 2에 의하여 集光되어, 그 前方에 놓여진 카메라에 入射된다. 焦圖面에는 燃燒室中에 존재하는 가스의 密度勾配에 의한 슈리렌効果를 조절하기 위하여 口徑(aperture)을 둔다. 또 火焰의 自發光에 의한 影響을 消去하기 위하여 口徑과 카메라 사이에 中心波長 694.3mm, 半値幅 5㎜인 干涉필터를 두었다. 光量의 조절 및 光原의 强度를 균일하게 하기 위하여 레이저와 렌즈 1 사이에 散亂膜을 두 장 넣었다. 필림으로는 팬크로메틱타입(Fugi. Neopan 400)을 사용하였으며, 焦點距離 300mm인 렌즈를 사용하여 35mm 카메라(Nikon FE2)로 촬영하였다.

火焰內의 매연粒子에 의한 散亂光强度는 吸收光强度에 비하여 대단히 작아 무시할수 있기 때문에 매연에 의한 入射光減衰量을 측정할 때 減衰量은 口徑의 크기에는 관계가 없다. 그러나, 燃料蒸氣나 燃燒가스의 密度勾配에 기인하는 슈리렌효과는 口徑이 작을수록 강하게 된다. 매연粒子에 의한 入射光減衰効果만을 檢出하고자 할 경우에는 슈리렌효과가 무시될 수 있도록 口徑의 直徑을 크게하면 좋겠지만 매연의 生成은 火焰의 거동과 관련시켜서 고찰하여야 하므로 火焰 全體的인 境界의 變化도 관찰하여야 한다. 따라서 口徑의 크기는 충분히 검토하여 선택하였다. Fig. 5는 口徑의 크기가 陰影寫眞에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 口徑이 큰 경우에는 매연粒子群의 陰影만이 나타나 있으나 口徑의 直徑이 작은 경우에는 매연粒子群의 陰影과 동시에 火焰의 密度勾配에 의한 明暗도 나타나 있다. 本 硏究의 目的을 고려하여 直徑 10mm인 口徑를 사용하였으며 이것의 檢出半角은 約 0.19°이다.

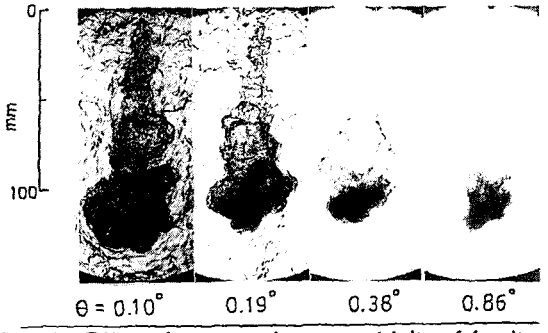

Fig. 5 Effect of aperture size on sensitivity of density gradient in flame

3.3 레이저빔 減衰法

디젤 火焰內의 매연濃度를 定量的으로 측정하기 위하여 레이저빔 減衰法을 이용하였다. 光原으로서는 發振波長 632.8mm, 出力에너지 25mW, 빔 直徑이 1.3mm인 He-Ne레이저를 사용하였다. 레이저빔이 半透明鏡에 入射하기 전에 레이저빔을 기계적으로 斷續하는 2kHz의 초퍼(chopper)가 있다. 火焰內의 매연群을 통과하여 强度가 減衰한 레이저빔은 噴射軸으로부터 90mm 떨어져 놓여 있는 Mylar 散亂膜을 통하여 光電子增培管에 검출된다. 이 때 透過率 τ는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau=(E_t-E_f)/E_b \tag{6}$$

여기서 E_b는 火焰이 없을 때 레이저빔 만에 의한 檢出强度, E_f는 레이저와 火焰 사이에 초퍼가 닫혔을 때 火焰만에 의한 檢出强度, E_t는 초퍼가 열려 있을 때의 檢出强度로 透過光의 强度와 E_f의 合과 같다.

3.4 實驗條件

Table 1에 供試노즐과 噴射條件을, Fig. 6에 Bosch式으로 측정한 噴射率을 나타내었다. 노즐은 노즐孔의 形狀比가 3.0인 hole type을 사용하였으

Table 1 Injection conditions

Fuel	n-tridecane
Nozzle opening pressure	21.7MPa
Nozzle dia.	0.2mm
Inj. duration	3.0ms
Fuel amount	16.0mg
I/d	3.0
Pump speed	750rpm

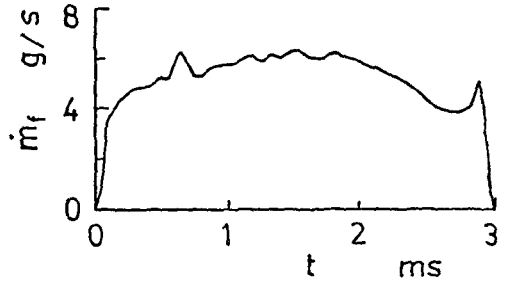

Fig. 6 Rate of fuel injection at condition shown in Table 1

Table 2 Surrounding atmosphere conditions

Series	Atmosphere	Initial temp. T_1 K	Pressure P_2 MPa	Temp. T_2 K	Density ρ_2 kg/m^3	Ignition delay ms
Non-evaporating spray	N2	—	1.24	288	15.1	—
Evaporating spray	N2	340	2.93	700	14.7	—
Flame *S*	Air	320	3.23	720	15.7	1.0
Flame *L*	Air	300	3.13	660	16.7	1.8
Flame *I*	Air	320	3.08	690	15.6	1.3

며 平均噴射率은 5.3g/s이다. 自動車用 디젤機關의 燃料로서는 輕油가 흔히 사용되고 있으나 現在 판매되고 있는 輕油는 製造會社와 製造日時에 따라 그 組成이 조금씩 다르기 때문에 輕油와 비슷한 組成을 갖고 또 化學的 特性을 알 수 있는 순수한 n-tridecane($C_{13}H_{28}$)을 사용하였다. Table 2는 實驗을 행한 雰圍氣條件이며, 高壓室溫 窒素雰圍氣中에 噴射된 噴霧를 蒸發噴霧라고 한다. 또 高壓高溫의 空氣中에 噴射된 경우, 즉 着火가 일어나는 경우는 着火지연이 1.0ms인 경우의 火焰을 *S*, 1.8 ms인 경우의 火焰을 *L*이라고 하고 衝突火焰인 경우는 火焰 *I*라고 하기로 한다.

熱發生率은 急速壓縮裝置 燃燒室內의 가스가 均一性狀을 갖고 있는 理想氣體로 가정하여 그 特性式과 실측한 壓力上昇率을 이용하여 구하였다. 즉 急速壓縮裝置 燃燒室의 壓力은 급속압축된 後 벽면 등으로 부터의 熱損失 때문에 壓力은 거의 일직선으로 서서히 강하하여 간다. 燃料가 噴射되기 시작하여 燃料의 蒸發에 의한 吸熱로 인하여 熱損失分 以上으로 壓力은 강하하고, 그 후 燃燒에 의한 壓力上昇이 시작된다. 따라서 연료 분사가 있기 前의 壓力降下線과 연소에 의한 壓力線과의 차이를 실측하여 熱發生率을 계산하였다. 또 本 硏究에서는 壓力이 最小되는 위치를 着火點으로 보고 valve lift로 부터 실측한 噴射開始로부터 이 점까지를 着火지연으로 定意하였다. 착화지연기간은 실린더의 加熱 및 給氣를 豫熱하여 조절하였다.

4. 實驗結果 및 考察

4.1 매연生成領域

Fig. 7은 非蒸發噴霧, 蒸發噴霧 및 着火지연이 1 ms인 火焰의 一連의 瞬間陰影寫眞 및 同火焰의 直接寫眞을 나타낸 것이다. 그림 中의 t는 噴射開始로부터의 경과 시간을 의미한다.

먼저, 非蒸發噴霧와 蒸發噴霧를 비교해 보면, 蒸發噴霧의 陰影 濃度는 噴霧先端部近에서 낮아져 있다. 이것은 噴霧先端部에 燃料蒸氣가 존재하고 있는 것을 나타내고 있다. 또 蒸發噴霧에서는 노즐噴口近方에 液相燃料의 존재를 나타내는 길이 40~50 mm의 가늘고 긴 검은 陰影이 보이며, 이것은 噴射된 燃料가 分裂蒸發하는 시간에 대응하는 거리로 생각된다.

蒸發噴霧와 火焰을 비교해 보면 噴射期間 중에 노즐噴口근방의 가늘고 긴 陰影의 길이는 火焰인 경우가 조금 짧으나 이것은 溫度가 높기 때문이라고 생각된다. 여기서 가장 주목하고 싶은 것은 火焰의 先端部近에 蒸發噴霧에서는 보이지 않는 검은 陰影부분이 나타나 있는 점이다. 또 이 火焰의 검은 陰影부분은 火焰의 直接寫眞에서 輝焰部分과 거의 일치하고 있다. 따라서 이 火焰先端部의 검은 陰影은 火焰內에 존재하는 매연粒子群에 의하여 入射光이 吸收된 것으로 판단된다.

이 部分의 매연 粒子濃度를 定量的으로 조사하기 의하여 레이저빔 減衰法에 의하여 실험을 행한 결과는 Fig. 8과 같다. 이것은 噴射開始로부터의 시간 t를 파라미터로하여 噴射軸에 따라서 측정한 매연濃度 C_s의 分布를 나타낸 것으로 噴射된 燃料에 함유되어 있는 炭素分中에서 매연으로 변환된 炭素의 質量比, 즉 매연變換率 R_s의 時間的 변화도 나타나 있다. Fig. 7과 Fig. 8로부터 매연濃度가 높은 領域이 火焰의 輝焰領域과 全般的으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

以上과 같이 陰影寫眞에서 볼 수 있는 검은 陰影

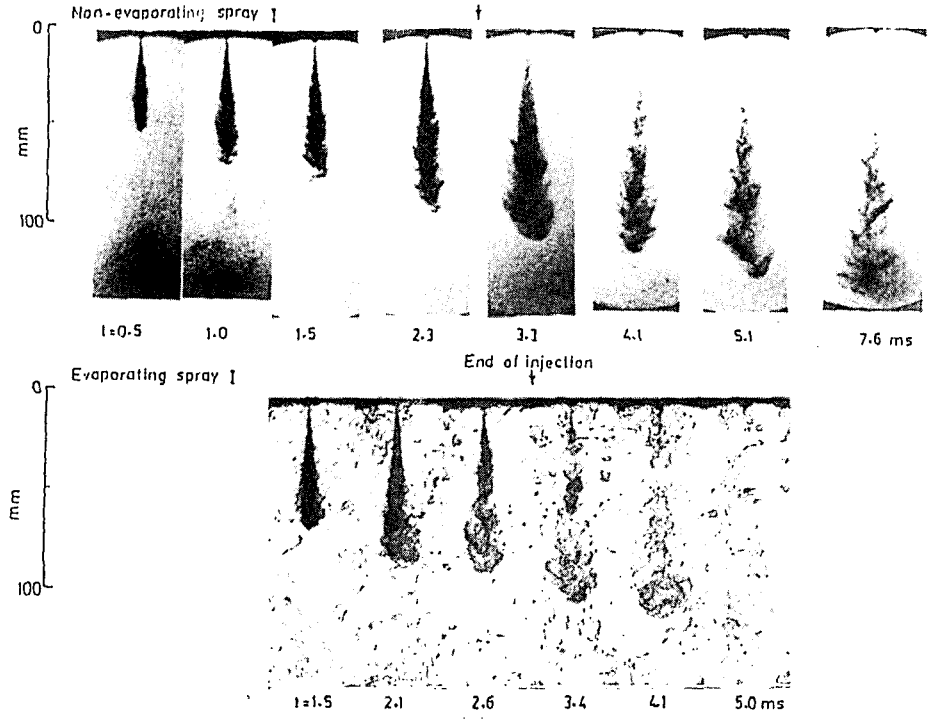

Fig. 7(a) Series of instantaneous shadow photographs of non-evaporating spray and evaporating spray

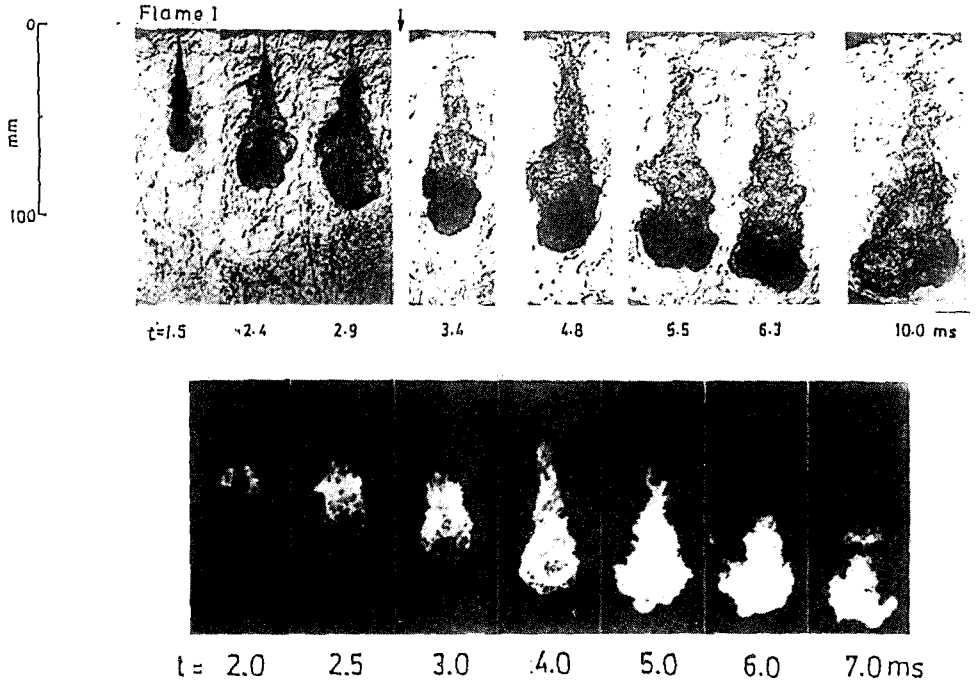

Fig. 7(b) Series of instantaneous shadow photographs of flame (ignition delay 1.0ms) and direct photographs of the flame

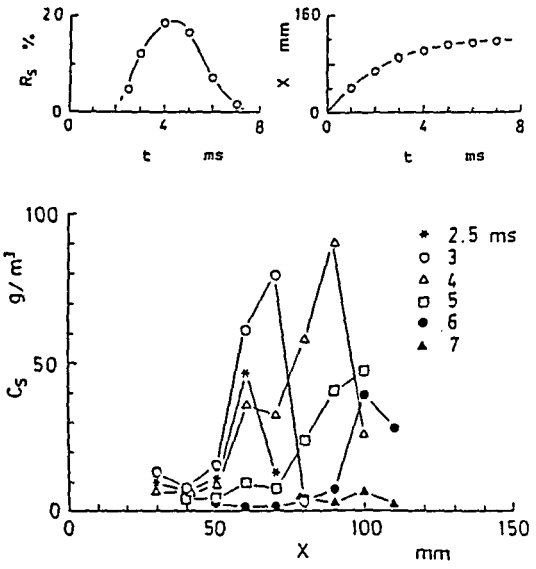

Fig. 8 Variation of soot concentration C_s along spray axis against distance X from nozzle orifice with time as parameter, variation of conversion rate of carbon to soot Rs with time, and tip penetration with time

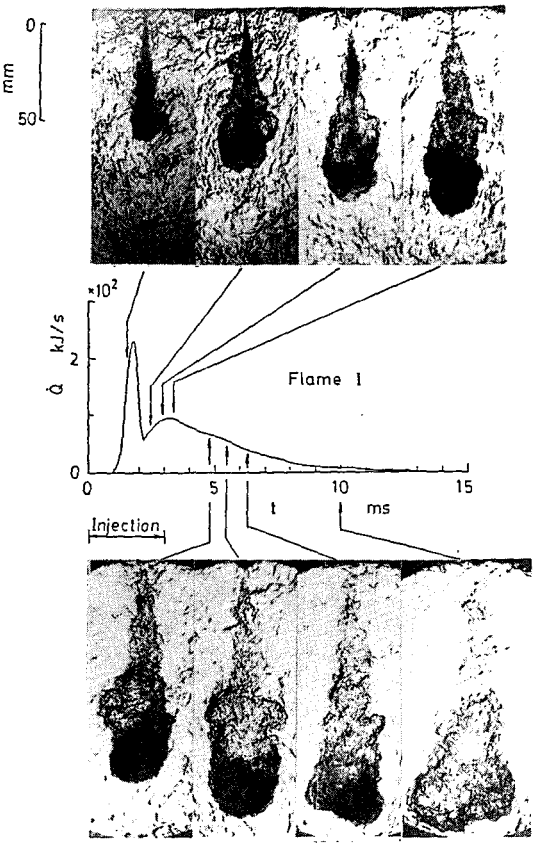

Fig. 9 Instantaneous photographs and heat release rate of flame I

部分은 매연粒子가 존재하고 있는 領域인 것이라고 판단할 수 있을 것이다. 이 火焰의 경우 매연은 노즐噴口로부터 約 70 mm의 위치에서 生成되어 그 濃度 C_s는 噴射開始後 3~4 ms에서 최고치에 달한 후 점차 酸化되어 감소한다. Fig. 8을 보면 매연變換率 R_s는 噴射終了後 1 ms에서 20%에 달하고 있다.

4.2 매연生成과 熱發生率의 關係

(1) 着火지연이 1.0 ms인 경우

着火지연이 1.0 ms인 경우의 瞬間陰影寫眞과 熱發生率을 나타낸 것이 Fig. 9이다. 매연은 初期燃燒期間中에는 나타나지 않고, 擴散燃燒가 시작함과 동시에 火焰先端부근에서 급속히 生成된다. 이 매연은 노즐噴口로부터 火焰先端部에 걸쳐서 발생하고, 그 濃度는 噴射終了後인 熱發生率이 거의 最高로 되는 t=3~3.5ms에 가장 높게된다. 陰影의 濃度 gray scale과 비교해 보면 t=3ms에 있어서 透過過은 數 %정도로 되고 이것은 매연농도로하여 10g/m³에 상당한다. 그 후 시간이 경과함에 따라 火焰先端은 이동하면서 擴散 또는 酸化되어 매연의 濃度는 감소한다. 그러나 燃燒期間의 後半인 t=6.4ms에 있어서도 매연은 계속 존재하고 있다.

그런데 非蒸發噴霧, 蒸發噴霧 및 火焰의 先端到達거리를 비교해 보면 Fig. 10에서 알수 있는 바과 같이 거의 같다. 또 小林등[11]에 의하면 着火지연이 짧은 自由噴霧火焰의 空氣導入量은 非蒸發噴霧의 空氣導入量과 거의 같다. 따라서 火焰中心軸方向의 當量比分布는 非蒸發噴霧의 軸方向의 當量比分布와 거의 같다고 假定하여 前報[7]에서 구한 非蒸發噴霧의 當量比分布曲線에 매연生成領域을 나타낸 것이 Fig. 11이다. 그림 中의 ϕ는 噴射軸方向의 斷面平均當量比를 나타낸다. ϕ_a은 斷面內의 燃料濃度分布를

$$\phi(r)=\phi_a(1-(r/r_o)^{3/2}) \tag{7}$$

로 가정하여 ϕ로부터 계산한 噴霧中心軸上의 當量比이다. 여기서 r은 半徑方向의 거리, r_o는 噴霧의 半徑이다. 그림 중의 斜線部가 매연生成領域이

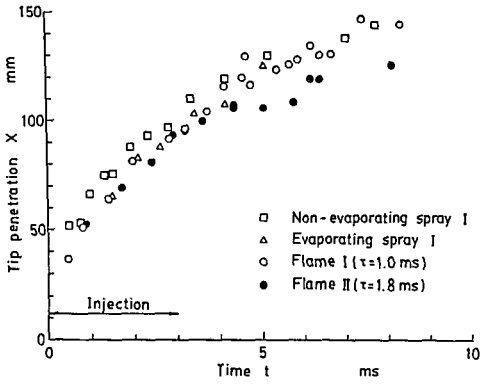

Fig. 10 Tip penetration of non-evaporation spray I, evaporating spray I, flame Ⅰ and flame Ⅱ

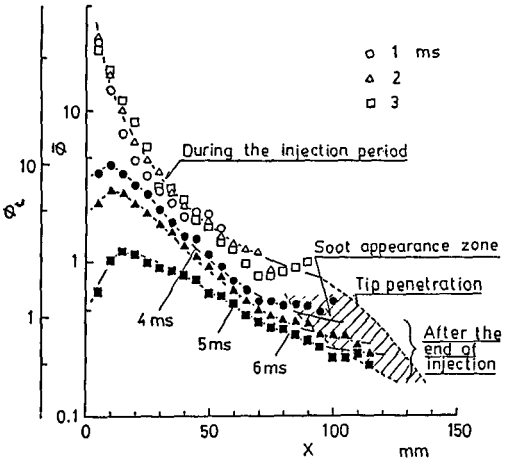

Fig. 11 Equivalence ratio ϕ versus distance X with time as a parameter measured on non-evaporating spray Ⅰ and soot formation zone estimated from instantaneous photographs of flame Ⅰ (ϕ : ϕ along spray axis, $\bar{\phi}$: ϕ averaged in cross section perpendicular to spray axis)

다. 매연生成領域의 $\bar{\phi}$는 1以下로 되어 있으나 $\bar{\phi}$가 1以下이더라도 火焰中心軸上에서 ϕ가 1以上인 混合氣의 小塊가 불균일하게 존재하고, 매연은 주로 그와 같은 部分에서 生成되리라고 생각된다. 일반적인 경우에는 當量比가 1.5以上에서 매연이 生成된다고 報告되어 있기 때문이다. 평균적으로 보아서 매연이 當量比가 가장 낮은 火焰先端 가까운 領域에서 生成된다고 하는 이 사실은 從來의 디젤火焰의 시뮬레이션등에서 제안된, 매연은 燃料過濃

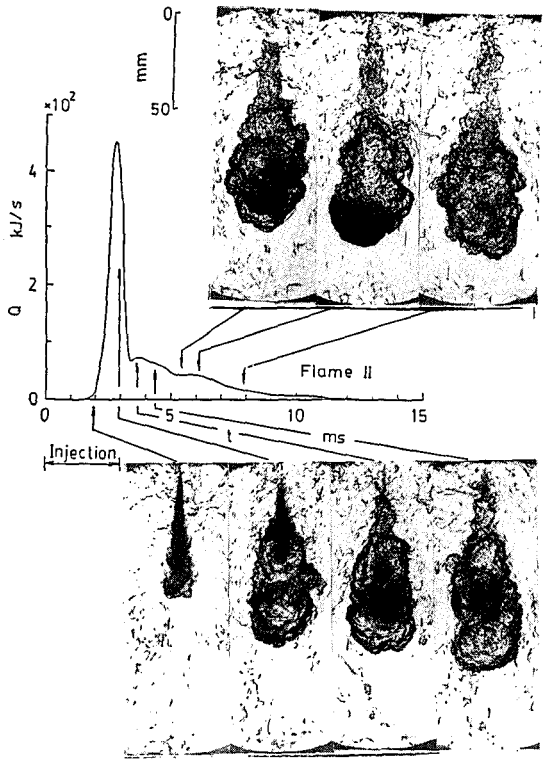

Fig. 12 Instantaneous photographs and heat release rate of flame Ⅱ

領域에서 生成된다는 모델을 否定한다.

매연이 노즐噴口근방의 燃料過濃領域에서 生成되지 않고, 노즐噴口에서 떨어진 $x \geq 70$ mm인 當量比가 낮은 領域에서 生成된다는 것은, 이 領域에서 混合이 진행되고 燃燒溫度가 높기 때문이라고 예측된다. 40 mm$\leq x \leq$70 mm인 燃料過濃이고 비교적 溫度가 낮은 領域에서는 三輪등[12]이 가스샘플링실험에서 보인 바와 같이 燃料의 熱分解가 일어나 C_2H_2등 매연의 前驅物質이라고 생각되고 있는 物質이 生成되고 있다고 사료된다.

(2) 着火지연이 1.8 ms인 경우

着火지연이 1.8 ms인 경우의 瞬間陰影寫眞과 熱發生率을 Fig. 12에 나타내었다. 着火지연이 1.0 ms인 경우에 비하여 매연의 生成量이 전반적으로 작고, 또 매연이 최초로 나타나는 領域도 火焰先端部보다 火焰中心部에 있다. 이것은 着火지연이 길어질수록 噴射된 燃料와 空氣와의 混合이 잘 이루어지고 따라서 초기의 豫混合氣的 燃燒가 燃燒全體에서 차지하는 비율이 높아지고, 初期燃燒時의 급

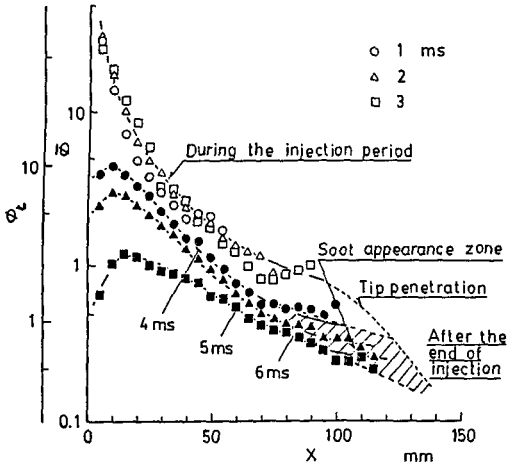

Fig. 13 Equivalence ratio on non-evaporating spray I and soot formation zone of flame I

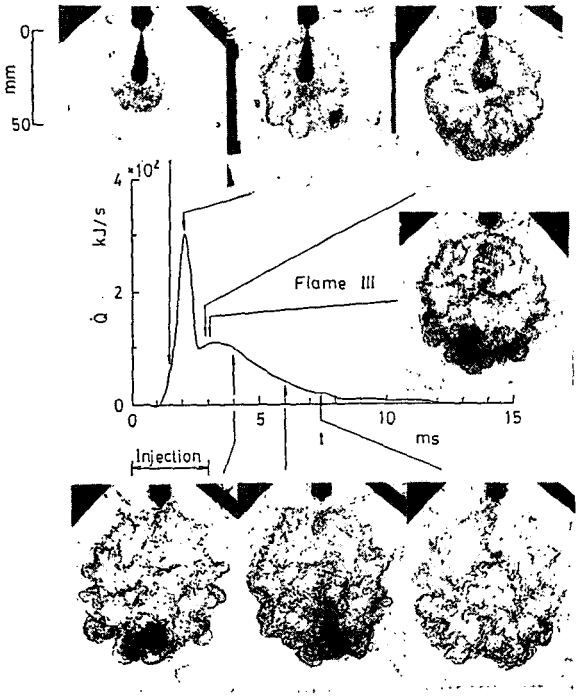

Fig. 14 Instantaneous photographs and heat release rate of flame III

격한 熱膨脹이 空氣導入率을 촉진시키기 때문이라고 생각된다. 즉 이 火焰의 경우, 着火지연이 짧은 火焰에 비하여, 매연生成이 억제되는 동시에 酸化가 촉진된다고 생각된다. 着火지연이 1.0 ms인 경우와 마찬가지로 非蒸發噴霧의 當量比分布曲線上에 매연의 生成領域을 나타내 본것이 Fig. 13이다. 噴射終了後는 火焰中央部 부근에서 生成된 매연은 下流로 輸送되면서 酸化, 消滅된다.

(3) 壁面에 衝突하는 경우

Fig. 14에 衝突距離 31 mm, 衝突角度 45°인 衝突火焰이 瞬間陰影寫眞과 熱發生率을 나타내었다. 衝突距離 31 mm는 Fig. 9와 13의 自由噴霧火焰의 液相部의 길이보다 짧기 때문에 燃料의 일부는 液相인 상태로 衝突하고 있다고 생각된다. 着火지연은 1.3ms이나 着火지연이 1.8 ms인 自由噴霧火焰보다도 매연의 生成量은 작은 것처럼 보이는데 이것은 衝突에 의하여 混合이 촉진되었기 때문이라고 생각된다. 衝突에 의한 混合의 促進 效果는 着火지연이 1.0 ms인 自由噴霧火焰보다 燃燒기간이 짧아져 있고 擴散燃燒期間의 熱發生率이 높게 되어 있는 것으로도 알 수 있다.

4.3 디젤火焰의 매연生成, 消滅機構

以上에서 디젤噴霧火焰내의 매연生成消滅에 대하여 論하여 왔으나 以下 本 實驗의 結果에 從來의 硏究를 참조로 하여 디젤噴霧火焰內의 매연生成, 消滅機構를 熱發生率과 관련시켜서 考察하기로 한다. Fig. 15는 디젤火焰內의 매연生成消滅機構의 槪念을 나타낸 것이다.

(1) 着火지연期間

三輪등[12]은 直接가스샘플링법을 이용하여 實際機關內의 디젤火焰의 化學成分濃度를 측정하여, 노즐噴口에서 40 mm보다 下流에서는 蒸發한 燃料가 高溫의 空氣와 燃燒生成物로부터 주어지는 熱에 의하여 급격히 熱分解가 일어나고, 노즐噴口에서 멀어질수록 CH_4, C_2H_2 및 C_2H_4와 같은 熱分解物質의 濃度가 높게되어 있다고 보고한 바 있다. 急速壓縮裝置內의 디젤噴霧火焰에 있어서도 약 1 ms인 着火지연기간 중에는 이것과 같은 현상이 일어나고 있다고 생각된다.

(2) 初期燃燒期間

着火지연기간中에 형성된 燃料蒸氣, 可燃性 熱分解生成物, 中間熱生成物등과 空氣와의 混合氣가 거의 동시에 燃燒하고, 火焰의 體積은 급격히 膨脹한다. 동시에 燃燒室의 壓力도 上昇한다. 直接寫眞의 관찰에 의하면 火焰은 不輝焰이고 또 陰影寫眞에는 검은 陰影이 보이지 않는다. 즉 火焰中에는 아직 매연은 生成되어 있지 않다. 그러나 液相領域 바로 下流에 있는 濃混合氣는 火焰周邊部의 高溫燃燒生

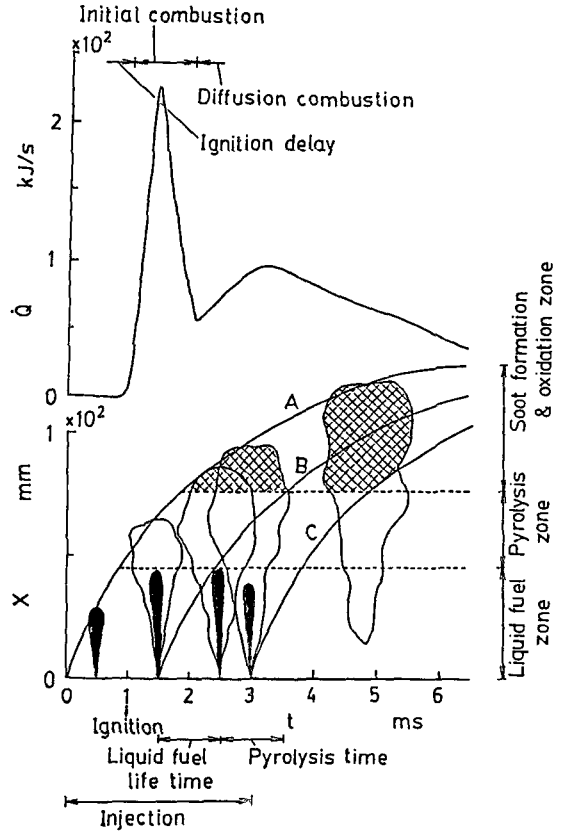

Fig. 15 Illustration of concept of soot formation in diesel flame

成物로부터 熱을 받아 熱分解가 급격히 진행된다고 생각된다. 이 過濃混合氣는 火焰 中心部에 도입된 燃燒生成物이나 空氣와의 混合을 계속하면서 下流 즉 火焰先端部로 흘러가면서 熱分解, 重合및 凝集 등의 과정을 거친다고 생각되어진다.

(3) 擴散燃燒期間

初期燃燒가 끝나고 擴散燃燒가 시작될 때 쯤 火焰先端 부근에 매연이 나타난다. 靑柳등[1]의 直接噴射式 디젤機關의 가스샘플링法에 의한 硏究結果에 의하면 擴散燃燒의 開始와 동시에 火焰 先端部에 매연이 검출되고 있다. 이 結果는 火焰 先端部에서 最初로 나타나는 것은 熱分解를 계속하면서 이동하는 混合氣가 平均當量比가 낮고溫度가 높은 火焰先端領域에 이르러 급속하게 매연을 生成하기 때문이라고 추정된다.

Fig. 15에서 곡선 A는 디젤噴霧火焰의 先端到達距離이다. 또 곡선 B 및 곡선 C는 각각 $t=1.5$ ms 및 3.0 ms(噴射終了時)에 噴射된 燃料의 到達距離로 燃料가 準定的으로 飛行한다고 가정하여 곡선 A를 각각의 시간만큼 平行移動시킨 것이다.

디젤噴霧火焰은 Fig. 15와 같이 $x \leq 40$ mm인 液相領域, 40 mm$\leq x \leq$70 mm인 熱分解領域 및 $x \geq$ 70 mm인 매연生成酸化領域인 3領域으로 대별할 수 있으며, 어떤 시각에 噴射된 燃料의 時間的인 履歷도 이들 領域에 체재하는 시간에 대응시켜서 液相壽命時間, 熱分解時間 및 매연生成酸化時間으로 나눌 수 있다.

擴散燃燒期間中에 噴射된 燃料는 分裂 微粒化하여 蒸發을 宗了할 때까지는 液相인 상태이며 이 領域은 Fig. 15에서 보는 바와 같이 노즐噴口로부터 약 40 mm이다. 이에 대응하는 約 1 ms의 시간이 液相壽命時間이다. 蒸發宗了와 동시에 燃料蒸氣는 火焰周邊部의 高溫의 燃燒가스와 混合하여 高溫으로 되고, 低級炭化水素는 熱分解한다. 이 熱分解生成物은 燃燒蒸氣와 더불어 火焰先端部로 이동하여 가면서 그 일부는 燃燒를 하지만 일부는 매연 前驅

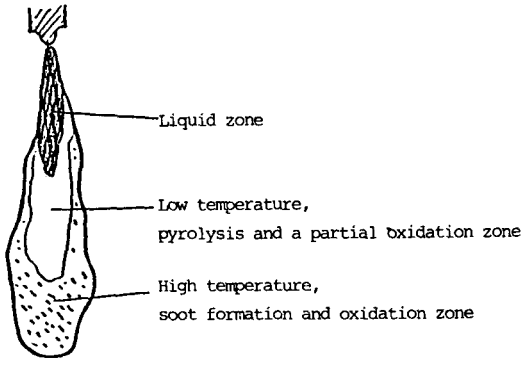

Fig. 16 Constructions of diesel flame in diffusion combustion period

物質로 된다고 생각된다. 이 領域을 熱分解領域이라고 하고 이에 대응하는 1 ms의 시간을 熱分解時間이라고 부른다. 正常噴霧火焰에 있어서도 매연이 生成되는 것은 노즐噴口로 부터 어느 정도 거리가 떨어진 下流이며, 擴散燃燒期間 중의 디젤火焰은 正常噴霧火焰과 類似한 構造를 갖고 있다고 생각된다.

陰影寫眞에 의하면 매연은 火焰先端부근에서 명확하게 보이나 Fig. 7의 火焰은 直接寫眞에 의하면 本報에서 말하는 熱分解領域도 火焰先端部에 비하여 輝度는 낮으면서 대체로 일정한 輝度에 달하고 있다. 이것은 이 部分에서는 濃度는 낮으나 매연 또는 매연 前驅物質의 存在를 나타내고 있다고 생각된다.

火焰의 高速度 네가티브 칼라寫眞을 2色法의 原理에 의하여 畵像解析한 安[13]의 결과를 보면 火焰中心軸方向의 輝度의 溫度分布는 熱分解領域, 매연生成領域이 모두 비교적 일정하게 되어 있으나 매연濃度는 火焰先端部가 압도적으로 높다. 결국 熱分解領域에서도 주의의 空氣와 접하는 火焰周邊部는 火焰溫度가 높기 때문에 매연이 生成되고 있다고 생각된다. 따라서 擴散燃燒期間中의 火焰은 Fig. 16과 같이 燃料의 液相領域, 熱分解領域 및 매연生成酸化領域의 構造를 갖고 있다고 사료된다.

(4) 噴射終了後

噴射終了直後 매연生成量은 최고로 되고, 그 後에 매연은 火焰先端部와 더불어 下流로 이동을 계속하면서 酸化消滅 되어간다. 噴射開始後 7~8 ms 정도가 되면 亂流擴散및 酸化에 의하여 대부분의 매연이 소멸된다.

5. 結 論

急速壓縮裝置內의 燃燒室에 實現된 디젤噴霧火焰內의 매연을 레이저 陰影寫眞法에 의하여 可視化하고 매연生成에 미치는 着火지연, 衝突등의 影響 및 매연生成消滅과 熱發生率의 관계를 밝혔다. 또 前報에서 測定한 非蒸發噴霧의 當量比分布와 매연生成領域과의 관계에 대하여 考察하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 着火지연이 約 1ms인 경우, 매연은 擴散燃燒의 開始와 동시에 火焰先端部에나타나, 噴射終了直後에 매연濃度는 最高로 된다. 그 후 酸化에 의하여 점차 消滅해간다.

(2) 매연이 平均的으로 當量比가 낮은 火焰先端部에 生成되는 理由는 蒸發한 燃料가 熱分解하여 매연의 前驅物質을 거쳐서 매연으로 될 때까지에는 시간을 필요로 하고, 매연生成이 급속하게 진행되기 위해서는 燃燒가 활발한 高溫場이 필요하다고 생각된다.

(3) 着火지연이 1.8 ms로 긴 경우에는 매연이 火焰中央에서 발생하나, 매연濃度는 着火지연이 1 ms인 경우에 비하여 낮고, 매연의 酸化消滅도 빠르다.

(4) 衝突火焰인 경우는 衝突하지않는 火爐에 비하여 擴散燃燒期間中의 熱發生率이 높고 燃燒期間도 짧다. 또 火焰內의 매연生成量도 작아진다. 이것은 衝突에 의하여 混合이 촉진된 것이기 때문이라고 생각된다.

참 고 문 헌

(1) Aoyagi, Y., Kamimoto, T., Matsu, Y. and Matsuoka, S., 1980, "A Gas Sampling Study on the Formation Processes of Soot and No in a DI Diesel Engine", SAE Paper No. 800254.

(2) Matsu, Y., Kamimoto, T., and Matsuoka, S., 1982, "Formation and Oxidation Processes of Soot Particulates in a DI Diesel Engine-An Experimental Study via the Two-color Method", SAE Paper No. 8204464.

(3) Kamimoto, T., Matsuoka, S. and Miyari, Y., 1982, "Soot Oxidation Rate in the Flame in a DI Diesel Engine", IMech E, C 103/82, pp. 259~265.

(4) Khan, I.M., Greeves, G., and Wang, C.H.T., 1973,

"Factors Affecting Smoke and Gaseous Emissions from Direct Injection Engines and a Method of Calculation", SAE Paper No. 730169.

(5) 池上詢, 鹽路昌宏, 1981, "ディーゼル機關の黑煙生成の豫測", 內燃機關合同シンポジウム講演論文集 (81-1-27), pp. 163~168.

(6) Mansouri, S.H., Heywood, J.B., and Radhakrishnan, K., 1982, "Divided-Chamber Diesel Engine, Part 1; A Cycle-Simulation Which Predicts Performance and Emissions", SAE Paper No. 820273.

(7) 張英俊, 神本武征, 1988, "陰影寫眞의 畵像解析에 의한 디이젤噴霧의 硏究", 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第2號, pp. 319~327.

(8) Chippett, S., and Gray, W.A., 1978, "The Size and Optical Properties of Soot Particles", Combustion and Flame, 31, pp. 149~159.

(9) Park, C., and Appleton, J.P., 1973, "Shock Tube Measurement of Soot Oxidation Rates", Combustion and Flame, 20, pp. 369~379.

(10) Kamimoto, T., Kobayashi, H., and Matsuoka, S., 1981, "A Big Size Rapid Compression Machine for Fundamental Studies of Diesel Combustion", SAE Paper No. 811004.

(11) Kobayashi, H., Kamimoto, T., and Matsuoka, S., 1981, "A Photographic and Thermodynamic Study of Diesel Combustion in a Rapid Compression Machine", SAE Paper No. 810259.

(12) 三輪惠, 李新和, 池上詢, 1983, "ディーゼル噴霧の發達と熱分解", 日本機械學會講演論文集, No. 830~3, 1-2.

(13) 安秀吉, 1982, "畵像解析法よるディゼル噴霧火炎に關する硏究", 東京工大 博士學位 論文.